

עלון

אישהח"מ

עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 16

ספטמבר 2006

עורך: דן גבעולי, הפקולטה להנדסת אוירונאוטיקה וחלל, טכניון, חיפה 32000, טל. 8293814 (04), פקס 8292030 (04), דואר אלקטרוני: givolid@aerodyne.technion.ac.il
חברי ועד אישהח"מ: עמנואל אור (מזכיר-גזבר), מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי, יצחק הררי (נשיא), יונתן טל (אחראי האתר), זהר יוסיבש
איש-קשר עם ECCOMAS: מישל ברקובייר
ועדת ביקורת: משה איזנברגר ועמיאל הרשאה
אתר אישהח"מ (IACMM) באינטרנט: <http://www.iacmm.org.il>
רישום לחברות באגוד ופרטים נוספים: באתר האגוד הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר, ד"ר עמנואל אור, טל. 9908640 (04), פקס 9908164 (04), דואר אלקטרוני: emanuelo@rafael.co.il

שילוב אנליזת אלמנטים סופיים בתהליך התכנן של מוצרים ביו-רפואיים

שמוליק קידר
ADCOM, Applied Computational Mechanics
s-keidar@bezeqint.net

שיטת האלמנטים הסופיים (Finite Element Method) הופכת בקצב הולך וגובר לכלי מקובל לחיזוי ביצועי המוצר בקרב חברות רבות, המפתחות מוצרים בתחום הביו-רפואי. יתרה מזאת, רשויות רבות בתחום הרפואי ובראשן ה-FDA Food and Drug Administration (האמריקאי, המאשרות את המוצרים לשימוש, דורשות אנליזות אלמנט סופי כחלק מתהליך אישור המוצר. שימוש נכון בשיטה מאפשר לחזות את התנהגות המוצר החל משלב הייצור וההרכבה, דרך הכנסתו לגוף וכלה בפעולתו תחת עומסים פיסיולוגיים. בתחום זה, במרבית המקרים, הבעיה הפיסיקלית אותה נדרש לפתור היא לא ליניארית ואינה ניתנת לפתרון אנליטי. ישנם מספר מקורות לאי הליניאריות של בעיה אופיינית: שינויי גיאומטריה גדולים, התנהגות החומר ומגע בין גופים שונים או בין הגוף לעצמו. עקב כך, פתרון נומרי של הבעיה הוא במקרים

הערות העורך:

נא שלחו לכתובת המערכת (בדואר אלקטרוני או רגיל) חומר לפרסום בעלון. ניתן ורצוי לצרף ציורים ותמונות. לידיעת חברות: ניתן גם לפרסם חומר מסחרי-פרסומי בתשלום. לפרטים נא לפנות למערכת. גירסה צבעונית של עלון זה מופיעה באתר האגוד (ראה לעיל).

חידוש רישום באגוד:

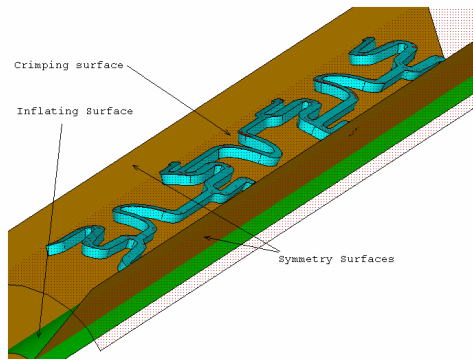
אנא הרשמו כחברים באגוד או חדשו את חברותכם! טופס רישום עם פרטים מלאים ניתן למצוא באתר <http://www.iacmm.org.il/member>

ISCM-20

יום העיון ה-20 התקיים ב-23.06.06 באוניברסיטת ת"א. המארגנים המקומיים היו סלבה קרילוב ואלכס גלפגט. יום העיון היה מעניין ומוצלח, וכלל הרצאות אורח של Abigail Wacher מהטכניון על אלמנטים סופיים נעים ושל Stefan Hartmann מאוני' Kassel בגרמניה על חידושים בויסקואלסטיות חישובית, וכן לומדה של פנחס בר-יוסף על שיטות גלדקין בלתי-רציפות. המאמר המופיע בגיליון זה גם הוא הוצג במסגרת יום העיון.

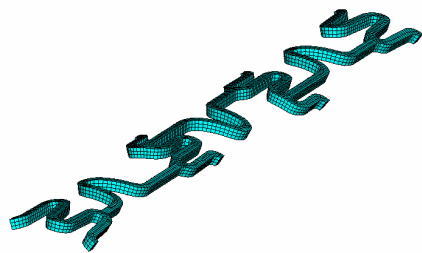
ISCM-21

יום העיון ה-21 יתקיים ב-19.10.06 באוניברסיטת בן-גוריון בנגב. המארגן המקומי הוא זהר יוסיבש. פרטים נוספים ניתן למצוא באתר אישהח"מ.



איור 1: מבט כללי של המודל.

המתבטאת בקשיחות יתר תחת עומסי כפיפה. לאלמנטים מסדר שני אין את הבעיה הזו. למרות זאת, כאשר הרשת מעוותת או כאשר יש גרדיאנט למומנט הכפיפה, אלמנטים מסדר שני יכולים להציג מידה מסוימת של נעילה. תופעה נוספת העלולה להופיע באלמנטים מסדר ראשון עם אינטגרציה מלאה היא נעילה נפחית (volumetric locking). התופעה מתרחשת כאשר יש אילוף קינמטי של (כמעט) שמור נפח. האילוף פועל בכל נקודות האינטגרציה של האלמנט והתוצאה היא התנהגות קשיחה מדי. התופעה מתבטאת בשינוי מהיר של הלחץ ההידרוסטטטי בין אלמנטים (נקודות אינטגרציה) שכנים. התופעה קימת גם באלמנטים מסדר שני. ישנן מספר טכניקות המיועדות לפתור את הבעיות שנזכרו לעיל (לדוגמה אינטגרציה מופחתת) ולכל אחת יתרונות וחסרונות עבור סוג בעיה נתון (ראה למשל פרק 3.2 בספר התיאוריה של ABAQUS גרסה 6.6). בבעיה הנדונה, ישנם גם עומסים הגורמים לכפיפה משמעותית בחומר וגם אילוף של (כמעט) שימור נפח הנובע מדפורמציה פלסטית בחומר. במודל זה נעשה שימוש באלמנטי לבנה (brick) מסדר ראשון עם אינטגרציה מלאה מסוג incompatible modes. אלמנט זה מתגבר על התופעות שהוזכרו לעיל על ידי תוספת של דרגות חופש פנימיות, מה שהופך אותו ליקר יותר מאלמנטים מסדר ראשון רגילים אך זול בהרבה מאלמנטים מסדר שני. אלמנט זה רגיש לעיוותי צורה (מקביליות, טרפזיות) ולכן חשוב לבנות רשת מסודרת היטב לקבלת פתרון מדויק.



איור 2: רשת.

תהליך הכיווץ (שלב 1) מתאפשר באנליזה על ידי פתרון בעיית מגע בין משטח חיצוני גלילי (crimping surface באיור 1), קשיח לחלוטין, בעל קוטר התחלתי זהה לזה של הסטנט לבין המשטח החיצוני של הסטנט. הכתבת הזוה רדיאלית שלילית על המשטח הקשיח תגרום לסטנט להתכווץ בהתאם. במהלך שלב זה נוצר מגע בין קורות הסטנט שנמנעו אחת כנגד השנייה. משטחי הסימטריה באיור 1 (symmetry surfaces) הם משטחים קשיחים, עימם באות קורות הסטנט במגע במהלך תהליך הכיווץ (מדמה קורות שכנות מאחר והמודל מכיל רק את החלק הסימטרי הקטן ביותר). לאחר סיום שלב 1 מוסר בהדרגה המשטח הגלילי על ידי הכתבת תווה רדיאלית חיובית (recoil). גם שלב הניפוח מתבצע ע"י פתרון בעיית מגע בין המשטח הפנימי של הסטנט ומשטח גלילי קשיח (inflating surface

רבים מאתגר מבחינה חישובית ודורש מיומנות גבוהה מהאנליסט. למרות זאת, הטכנולוגיה הקיימת בחלק מתוכנות האנליזה המסחריות מספיק בשלה ורובסטית, על מנת לאפשר שילוב אנליזות בתהליך התכן של המוצר על בסיס יום יומי. גורם חשוב נוסף, המאפשר לקבל תוצאות בזמנים קצרים, הוא הזמינות של משאבי מחשב. מעבדי 64-bit, המשולבים כיום בכל מחשב אישי סטנדרטי, מאפשרים שימוש בכמות גדולה של זיכרון פיסיקלי (RAM). עובדה זו מבטלת חלק ניכר מהצורך לכתוב ולקרוא מידע מהדיסק הקשיח ובכך מקטינה משמעותית את הזמן הכללי (wall clock time) הדרוש להשלמת החישוב. המוטיבציה העיקרית לשימוש באנליזות נובעת מהפחתה משמעותית בצורך לבצע ניסויים והיכולת לבדוק במהירות השפעה של שינויי תכן על התנהגות המוצר. יכולת זו מאפשרת לבצע אופטימיזציה של המוצר ולהביאו מהר יותר לשוק. כמובן שהישענות על מודל נומרי בתהליך הפיתוח מתאפשרת לאחר תהליך ולידציה של המודל, הכולל בין היתר אפיון והתאמת מודל התנהגות החומר, בחירת אלמנט מתאים לסוג הבעיה, בניית רשת מתאימה והשוואה לניסויים. על מנת להמחיש את האמור לעיל, אציג שתי דוגמאות של פיתוח מוצרים ביו-רפואיים בהם שולבו אנליזות בתהליך התכן ואתאר בקצרה היבטים שונים של בניית המודל. האנליזות בוצעו בתוכנת אלמנטים סופיים מסחרית ABAQUS.

דוגמה ראשונה: Coronary stent הבעיה הפיסיקלית ומטרת האנליזה

סטנט (stent) הוא מבנה מתכתי, המתוכנן לתמוך רדיאלית בדפנות כלי דם בהם יש חסימה חלקית של זרימת דם. הגיאומטריה של הסטנט מתקבלת על ידי חיתוך לייזר של צינור חלול. ישנם מספר שלבים פיסיקליים אותם יש למדל (התיאור כאן מתייחס לסטנט מחומר אלסטו-פלסטי):

1. כיווץ (crimp). הסטנט מכווץ לקוטר המתאים למערכת המחדירה אותו לגוף (delivery system). הכיווץ מבוצע על בלון ריק מקופל.
2. שחרור (recoil). הסרת משטחי הכיווץ. בד"כ יש מידה מסוימת של שחרור אלסטי במתכת.
3. נפוח הבלון (balloon expansion). נפוח הבלון מבוצע לאחר מיקום הסטנט בגוף. הניפוח מגדיל את קוטר הסטנט לקוטרו הסופי (גדול מהקוטר הנומינלי של כלי הדם).
4. שחרור (recoil). שחרור הלחץ מהבלון. גם כאן יש מידה מסוימת של שחרור אלסטי במתכת. כמו כן דופן כלי הדם משפיעה במקצת על מידת השחרור עקב המגע בינה לבין הסטנט.
5. עומס מחזורי (alternating load). הסטנט נתון לעומס מחזורי הנובע משינוי לחץ הדם בגוף.

בנוסף לקבלת הגיאומטריה של הסטנט בכל שלב, מטרת האנליזה היא לוודא שבשלב 4-1 אין סכנה להיווצרות כשל בחומר, העלול להיגרם מרמת עיבור הגבוהה מעיבור הקריעה של החומר. (רמות העיבורים הפלסטיים מגיעים לעשרות אחוזים בסוף הניפוח). בשלב 5 מטרת האנליזה היא לחשב את המאמץ המשתנה, על מנת להעריך אם יש סכנה לשבר התעיפות. דרישת ה FDA היא לעמידות ב 400 מיליון מחזורים (= 10 שנים).

המודל הנומרי (באדיבות Existent Ltd עבורה בוצעה העבודה) איור 1 מראה מבט כללי של מרכיבי המודל. גיאומטריית הסטנט במודל היא החלק המחזורי הקטן ביותר תחת תנאי סימטריה מתאימים. איור 2 מראה את הרשת שנבנתה.

בחירת סוג אלמנט מתאים לבעיה אינה תמיד משימה טריוויאלית. כידוע, אלמנטים מסדר ראשון בעלי אינטגרציה מלאה סובלים מתופעה הנקראת shear locking

האזור החסום בכלי הדם, על מנת להפעיל כוח רדיאלי על הדופן הפנימית שלו ובכך להרחיבו.



איור 4: The AngioSculpt balloon.

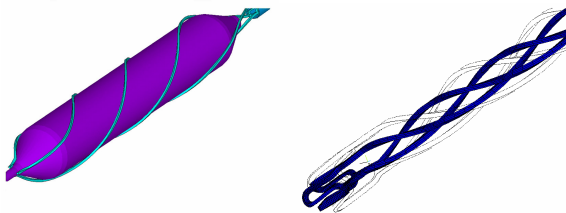
המוצר הנדון, AngioSculpt, של Angioscore מורכב מהתקן nitinol סלילי המתנפח עם הבלון ומעצים את הכוח הרדיאלי שמפעיל הבלון לאורך מסלול מוגדר מראש. לאחר הורדת הלחץ חוזר ההתקן לתצורה המקורית שלו ומאפשר שימוש חוזר. הבחירה ב-nitinol התבצעה בשל התכונות הסופר-אלסטיות של החומר המאפשרות תאום קשיחות בין הבלון לסליל במהלך הניפוח והורדת הלחץ. לצד אחד של ההתקן מחוברת צינורית מפולימר, שבין היתר, תפקידה להקנות קשיחות צירית רצויה. בפיתוח המוצר נעשה שימוש נרחב באנליזות, על מנת לקבל מוצר אופטימאלי (ראה [1] לפרטים נוספים). כיום, המוצר מסחרי ונמצא בשימוש בארצות רבות (כולל ישראל). השלבים הפיסיקליים הם:

1. הקניית צורה (shape setting). הגיאומטריה המקורית מאולצת לתצורה הסופית שלה ועוברת תהליך שבסופו החומר חופשי ממאמצים.
2. חיבור הצינורית. הצינורית מולחמת לצד הפרוקסימלי (proximal).
3. ניפוח הבלון (balloon expansion).

מטרת האנליזה היא לקבל את תצורת ההתקן בכל שלב של התהליך, לבדוק האם העיבור בחומר אינו עולה על המותר, להעריך אם יש סכנה של שבר התעייפות עבור מספר הפעמים בו מופעל ההתקן ולבדוק השפעת שינוי תכן על ה"ל". ה-nitinol מיוצג במודל על ידי חוק התנהגות סופר אלסטי שקיים ב-ABAQUS. הקבועים הדרושים להגדרת המודל התקבלו מניסוי פיסיקלי.

המודל הנומרי (באדיבות AngioScore Inc., Alameda, CA) הסליל רושת באלמנטי לבנה מסדר ראשון והצינורית

באלמנטי קליפה (shell). השלב הראשון (shape setting) מתקבל באנליזה על ידי פתרון בעיית מגע בין גליל קשיח למשטח החיצוני של הסליל, כאשר הקטנת הקוטר של הגליל מאלצת אותו לשנות צורה בהתאם. לאחר קבלת הקוטר הרצוי מופעלת ב-ABAQUS טכניקה המאפשרת שחרור מאמצים ועיבורים בחומר המדמה את התוצאה של התהליך הפיסיקלי (anneal). לאחר שלב זה מתבצע החיבור של הצינורית אל הצד הפרוקסימלי של הסליל. החיבור מתאפשר במודל על ידי שימוש בקשרים קינמטיים בין דרגות החופש של צמתי הצינורית והסליל. הניפוח מתקבל אף הוא מפתרון בעיית מגע בין הבלון, שמיוצג על ידי משטח קשיח, לבין הדופן הפנימית של הסליל. גיאומטריית הבלון במקרה זה אינה גליל פשוט ויש לחשב בכל אזור של הבלון את ההזזות המתאימות על מנת לקבל את התצורה הסופית הנכונה שלו.

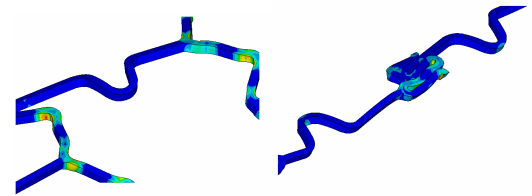


איור 5: תצורת הסליל בסוף שלב 1 (מימין) ובסוף הניפוח (משמאל).

באיור 1) אותו מרחיבים רדיאלית. בסיום הניפוח מוסר בהדרגה משטח הניפוח על ידי הכתבת תזוזה רדיאלית שלילית ומתקבלת התצורה הסופית של הסטנט כפי שהוא פרוס בגוף. ניתן להבין כי פתרון מסוג זה דורש שימוש נרחב באלמנטי מגע. במודל זה נעשה שימוש באלמנטי מגע מסוג surface-to-surface, המאפשרים להגדיר תנאי מגע בין שני משטחים אלסטיים או משטח אלסטי ומשטח קשיח. השיטה המתמטית שנבחרה לאכיפת אילוצי המגע היא שיטת penalty. ראוי לציין כי פתרון בעיות מגע הינו תהליך איטרטיבי, הדורש שימוש בפרמטרים כגון קשיחות מגע ומידת חפיפה מותרת בין המשטחים (penetration tolerance). פרמטרים אלו משפיעים על קצב ההתכנסות ואיכות אכיפת המגע בין המשטחים. באזורים שונים במודל בדרך כלל מתאימים פרמטרים בעלי ערך שונה. קביעת הפרמטרים היא לרוב תהליך של ניסוי וטעיה (trail and error).

תוצאות

איור 3 מראה את תצורת הסטנט ושדה המאמצים בסוף תהליך הכיווץ (מימין) והניפוח (משמאל).



איור 3: שדה המאמצים – סוף שלב 1 (מימין) וסוף שלב 3 (משמאל).

על מנת לחשב האם יש סכנה לשבר התעייפות מקובל להשתמש במשוואת Goodman:

$$\frac{(S_A \cdot F)}{S_E} + \frac{S_M}{S_U} = 1$$

S_A = Alternating stress

S_E = Endurance limit stress

S_M = Mean stress

S_U = Ultimate stress

F = Alternating stress factor

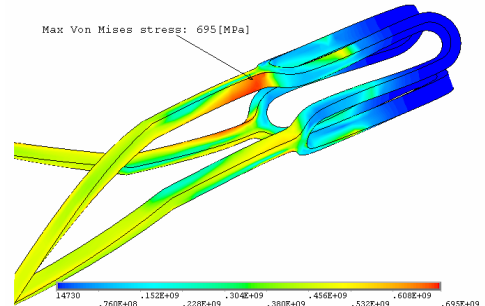
למעט המאמץ הממוצע, S_m , והמאמץ המשתנה, S_a , כל הפרמטרים בנוסחה הם קבועי חומר. המאמץ הממוצע מתקבל מהאנליזה בסוף שלב 4. על מנת לקבל את המאמץ המשתנה ניתן להעמיס את תצורת הסטנט המתקבלת בסוף שלב 4 בעומס של לחץ משתנה קיים בגוף. ערך הלחץ אותו הסטנט "מרגיש" ניתן לחישוב מיחס השטחים של הדופן החיצונית של הסטנט וצילינדר מלא המכסה את השטח בו הסטנט תומך (metallic area coverage) ומידת האלסטיות של דופן כלי הדם. ערך מוסף של חישוב מסוג זה שלא מתקבל מניסוי התעייפות הוא מקדם הביטחון בעזרתו ניתן לדעת בכמה ניתן להגדיל את המאמץ המשתנה ללא היווצרות כשל.

דוגמא שנייה: Scoring balloon הבעיה הפיסיקלית ומטרת האנליזה

הרחבה נפחית של כלי דם בעזרת בלון (angioplasty) – ראה איור 4 – היא פרוצדורה רפואית שמטרתה לאפשר זרימת דם טובה יותר בכלי דם חסומים. הבלון מנופח בתוך

תוצאות

איור 5 (בעמוד הקודם) מראה את הצורה המתקבלת לאחר השלב הראשון (מימין). בתמונה מוצגת הגיאומטריה ההתחלתית בקווים מקווקווים. האיור מראה גם את התצורה המתקבלת לאחר הניפוח (משמאל). איור 6 מראה את שדה המאמץ המתקבל באזור הדיסטלי (distal).



איור 6: שדה המאמצים בסוף הניפוח.

על מנת לחשב את אורך החיים נעשה שימוש במשוואת Coffin-Menson [2] המיועדת למספר נמוך של מחזורי התעייפות (low cycle fatigue):

$$\Delta \varepsilon = 0.296N^{-0.156}$$

$$\Delta \varepsilon = \text{Strain change}$$

$$N = \text{Cycles to failure}$$

השינוי בעיבור מתקבל מהאנליזה מה שמאפשר חישוב של מספר המחזורים לכשל.

מקורות

- [1] Konstantino E., Feld T., Keidar S., Gershony G., "Optimization of a Combined Nitinol/Polymer Device Using FEA", *Materials & Processes from Medical Devices Conference 2004*; St. Paul, MN; USA; 25-27 Aug. 2005. pp. 135-139. 2005
- [2] McNichols J.L., Brooks P.C., Cory J.S., "NiTi fatigue behavior", *J. Appl. Phys.* **52**(12), December 1981.

פינת השגיאה הקטנה

בגליון מס' 14 דנו בשגיאת המודל המתמטי. הפעם נתייחס לטוּג שגיאה אחר: **שגיאת הדיסקרטיזציה**.

זוהי השגיאה הנומרתית היסודית ביותר, הקיימת תמיד בשיטות של מכניקה חישובית.

כל השיטות החישוביות במכניקה מבוססות על החלפת הבעיה הנתונה, שיש בה מספר אינסופי של דרגות חופש (דרג"ח, נעלמים), בבעיה מקורבת שיש בה מספר סופי של דרג"ח (נעלמים). אם ניקח לדוגמה בעיה של הולכת חום במצב עמיד בטבלה דו-מימדית, בבעיה המקורית הנעלמים הם הטמפרטורות בכל נקודות הגוף. בשיטת האלמנטים הסופיים או בשיטת הפרשים הסופיים אנו מקרבים את הבעיה ע"י בניית "רשת" המכסה את הטבלה; הדרג"ח בבעיה המקורבת הן הטמפרטורות בצמתי הרשת. בשיטה ספקטרלית אנו מקרבים את הפתרון ע"י קומבינציה של מספר סופי של פונקציות עצמיות גלובליות, והדרג"ח הן המקדמים של פונקציות אלו. כמעט כל שיטה נומרית מייצרת בסופו של דבר מערכת של N משוואות אלגבריות עבור N הדרג"ח. השיטות נבדלות זו מזו בדרך בה הן מייצרות מערכת זו.

בבעיות תלויות-זמן, ציר הזמן הרציף עובר גם הוא דיסקרטיזציה, כלומר מוחלף ברשימה סופית של "צמתי זמן" בדידים. לדוגמה, הנעלמים בבעיית הולכת חום תלויות-זמן הם הטמפרטורות בצמתי הרשת המרחבית בכל צמתי הזמן. טכניקה מקובלת לפתרון בעיות כאלו היא "צעידה בזמן", ובה בכל צעד זמן פותרים מערכת משוואות עבור N הנעלמים שבצמתי הרשת. אגב, יש להעיר שהדיסקרטיזציה בזמן ובמרחב אינן בלתי-תלויות זו בזו, אולם על כך נרחיב בהזדמנות אחרת (וראו גם הכתבה של גרוסו והררי בנושא זה בגליון מס' 15).

כמובן שקרוב בעיה עם מספר אינסופי של דרג"ח ע"י בעיה עם מספר סופי של דרג"ח כרוך בשגיאה – זו שגיאת הדיסקרטיזציה. ככל שמספר הדרג"ח N גדול יותר, כך (אם השיטה טובה) השגיאה קטנה יותר, והפתרון המקורב קרוב יותר לפתרון המדויק של הבעיה. אם השיטה מתכנסת, אזי השגיאה שואפת לאפס כאשר N שואף לאינסוף.

בשיטת האלמנטים הסופיים ניתן לדבר על הרשימה הגלובלית של כל הדרג"ח ועל דרג"ח של אלמנט בודד. ניתן להגדיל את מספר הדרג"ח הכולל ע"י הוספת אלמנטים לרשת, אולם ניתן גם להגדיל את מספר הדרג"ח של אלמנט בודד (ע"י הגדלת דרגת הפולינום של פונקציות הצורה שלו). הפעולה האחרונה נקראת הגדלת הסדר של האלמנט. עם רשת נתונה, ישנן שתי דרכים עיקריות להגדיל את מספר הדרג"ח: ע"י עידון הרשת – עידון מסוג h או גירסת h – וע"י הגדלת הסדר של האלמנטים – עידון מסוג p או גירסת p. ניתן כמובן לבצע את שתי הפעולות במקביל (עידון h-p). בבעיות עם פתרון מדויק מספיק חלק, עידון מסוג h נותן התכנסות בקצב אלגברי, בעוד שעידון מסוג p נותן התכנסות בקצב אקספוננציאלי.

שגיאת הדיסקרטיזציה מושפעת חזק מאיכות הרשת. בהזדמנות זו נמנה חמישה **כללים חשובים לרישות טוב**, הנחוצים לשליטה טובה על שגיאת הדיסקרטיזציה:

1. **רזולוציה כללית**: יש לזהות את סקלת האורך של התופעות הצפויות בפתרון ולהבטיח כי גודל כל אלמנט יהיה קטן משמעותית מסקלה זו. לדוגמה, אם הפתרון מאופיין ע"י גלים בעלי אורך-גל מסויים, יש להשתמש במספר מספיק של אלמנטים לאורך גל.
2. **עידון מקומי**: יש לעדן את הרשת באזורים בהם צפוי שהפתרון עובר שינויים מהירים. לדוגמה: יש לעדן את הרשת ליד מקומות בשפה בהם יש שינוי משמעותי בגיאומטריה ("בליטה" או "שקע"), ליד חורים, בשכבות גבול, ליד פן-ביניים בין שני חומרים וכמובן ליד נקודות "סינגולריות" כגון קצה סדק.
3. **שימוש באלמנטים "יפים"**: יש להמנע מלהשתמש באלמנטים "מעוותים" מידי. העוות של אלמנט יכול להממד בעזרת הזוויות שלו. לדוגמה, אלמנט מרובע בעל זווית פנימית של 170° נחשב "מעוות" ויגרום לשגיאה מקומית גדולה.
4. **מנת המימדים של אלמנט**: ניתן להגדיר את מנת המימדים של אלמנט מרובע (לדוגמה) כיחס של אורכי הצלעות של המלבן הקטן ביותר בשטחו החוסם את האלמנט. כללית יש להמנע מאלמנטים שמנת המימדים שלהם שונה מאד מ-1 ("אלמנטי סיכה").
5. **הדרגתיות בעידון**. יש לעבור מאזור גס יחסית ברשת לאזור עדין יותר בצורה הדרגתית. במילים אחרות, יש לשאוף לכך שהיחס בין גדלי אלמנטים סמוכים בגירסת h (או בין דרגות הפולינום שלהם בגירסת p) לא יהיה גדול מאד.